

VŠB – Technická Univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

Experimentální ověření vlivu výrobní rychlosti na výsledné parametry taženého drátu

Experimental Verification of Speed Influence for Final Parameter of Drew Wire

Student:

Robert Jurásek

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jan Povýšil, Ph.D.

Ostrava 2013

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Zadání bakalářské práce

Student:

Robert Jurásek

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

2303R002 Strojírenská technologie

Téma:

Experimentální ověření vlivu výrobní rychlosti na výsledné parametry
taženého drátu

Experimental Verification of Speed Influence for Final Parameter of
Drew Wire

Zásady pro vypracování:

1. proveďte teoretický rozbor možných vlivů rychlosti na kvalitativní parametry tažení drátu
2. proveďte experimentální výrobu drátu s různou rychlostí
3. vyhodnoťte sledované kvalitativní parametry na experimentálně vyrobených drátech
4. vyhodnoťte nejvýhodnější variantu a získané přínosy

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] ŽÍDEK, M., DĚDEK, V., SOMMER, B. *Tváření oceli*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988, 520s. DT 669.14; 621.77(075.8)
- [2] DAVIS, J. R. *Metals Handbook, Vol. 14, Forming and Forging*, ASM Handbook, 1988, 978s., ISBN-13: 978-0871700209
- [3] MIELNIK, E. H. *Metalworking science and engineering*. 2.vyd. New York: McGraw-Hill, 1991, 976s., ISBN 0-07-041904-3

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Povýšil, Ph.D.**


Konzultant bakalářské práce: Petr Šimurda

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013


prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.
vedoucí katedry




doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 20.5.2013




podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická universita Ostrava (dále jen „VŠB – TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB–TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB–TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB–TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB–TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB–TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 20.5.2013


.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Robert Jurásek

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Zborov 59, Zborov 78901

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

JURÁSEK, R. *Experimentální ověření vlivu výrobní rychlosti na výsledné parametry taženého drátu : bakalářská práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2013, 35 s. Vedoucí práce: Ing. Jan Povýšil, Ph.D.

Tato práce se zabývá problematikou výroby wolframového drátu, kde je experimentálně ověřován vliv výrobní rychlosti na výsledné parametry drátu. Jedná se o výrobu taženého a čištěného wolframového drátu. V teoretické části je popsána technologie výroby tažení, nástroje a možné vlivy rychlosti tažení. Dále jsou uvedeny a popsány vady drátů při výrobě. Jsou zde také popsány vlastnosti vysokotavitelných kovů, které jsou při výrobě použity. Podstata experimentální části spočívá ve sledování průběhu síly a její stability při různých výrobních rychlostech. Výsledky z experimentů při různých rychlostech byly vyhodnoceny a porovnány.

ANOTATION OF BACHELOR THESIS

JURÁSEK, R. *Experimental Verification of Speed Influence for Final Parameters of Drew Wire : Bachelor Thesis*. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2013, 35 p. Thesis head: Ing. Jan Povýšil, Ph.D.

This thesis is dealing with the production of tungsten wire, where is experimentally verified the influence speed of production for final parameters of wire issue. It is production of drawn and cleaned tungsten wire. In theoretical part is described production technology of drawing, tools and possible influence of drawing speed. There are also mentioned and described defects of wires in production. Next are described features high-melting metals, which are in production used. The essence of the experimental part lies in monitoring the power progress and its stability at various production speed. Results from the experiments at different speed were evaluated and compared.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZNAČEK	- 3 -
1. ÚVOD	- 5 -
2. TECHNOLOGIE TAŽENÍ DRÁTU	- 7 -
2.1 Rozbor napětového stavu v průvlaku	- 8 -
2.2 Rozbor deformace	- 9 -
2.3 Rozbor napjatosti	- 13 -
2.4 Tažná síla	- 15 -
2.5 Tepelné zpracování při tažení	- 15 -
2.6 Mazání při tažení	- 16 -
3. PRŮVLAKY PRO TAŽENÍ	- 17 -
3.1 Materiály průvlaků	- 17 -
4. POUŽITÍ VYSOKOTAVITELNÝCH KOVŮ PŘI TAŽENÍ	- 22 -
4.1 Molybden	- 22 -
4.2 Wolfram	- 24 -
5. TEORETICKÝ VLIV VÝROBNÍ RYCHLOSTI NA PARAMETRY TAŽENÉHO DRÁTU	- 26 -
5.1 Rychlost tažení	- 26 -
5.2 Vady drátů	- 26 -
6. EXPERIMENTÁLNÍ VÝROBA DRÁTŮ RŮZNOU RYCHLOSTÍ	- 28 -
6.1 Výroba a měření na čistících strojích	- 28 -
6.2 Výroba a měření na tažících strojích	- 28 -
6.3 Výroba a měření na rovnacích strojích	- 29 -
7. VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU	- 30 -
8. ZÁVĚR A DISKUZE O DOSAŽENÝCH VÝSLEDKÁCH	- 32 -
9. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	- 34 -
10. SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ	- 36 -
10. SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK	- 37 -

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZNAČEK

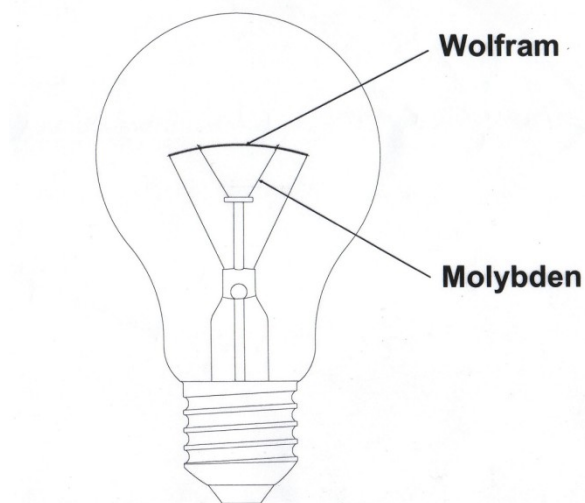
Značka	Popis	Jednotka
A	tažnost	$[\%]$
D_o	vstupní průměr drátu	$[mm]$
D_l	konečný průměr drátu	$[mm]$
F	tahová síla	$[N]$
F_t	tažná síla	$[N]$
HB	tvrdost podle Brinella	$[-]$
L_0	počáteční délka drátu	$[mm]$
L_n	délka drátu	$[mm]$
L_1	délka drátu	$[mm]$
L_2	délka drátu	$[mm]$
N	vertikální složka tahové síly	$[N]$
Q	příčná síla	$[N]$
\bar{Q}	poměrný plošný úběr	$[\%]$
Q_{abs}	absolutní plošný úběr	$[mm^2]$
S_0	počáteční průřez drátu	$[mm^2]$
S_1	průřez drátu	$[mm^2]$
S_2	průřez drátu	$[mm^2]$
S_n	průřez drátu	$[mm^2]$
T	třecí síla	$[N]$
V	deformovaný objem	$[m^3]$
dS_e	deformace ve směru hlavních os elementárních elips	$[\%]$
$d\epsilon_l$	poměrná deformace ve směru prodloužení elementární částice	$[\%]$
$d\epsilon_r$	poměrná deformace částice v radiálním směru	$[\%]$
$d\epsilon_t$	poměrná deformace v obvodovém (tečném směru)	$[\%]$
d_0	vstupní průměr drátu	$[mm]$
d_1	výstupní průměr drátu	$[mm]$
d_1	kalibrační průměr	$[mm]$
d_2	průměr jádra průvlatu	$[mm]$
d_3	průměr objímky průvlatu	$[mm]$
e_1	skutečná deformace	$[-]$
h_2	výška jádra průvlatu	$[mm]$
h_3	výška objímky průvlatu	$[mm]$
l	délka kuželovité části průvlatu	$[mm]$
l_d	délka pracovní části průvlatu	$[mm]$
l_1	délka vstupní části průvlatu	$[mm]$
l_2	délka tažné části průvlatu	$[mm]$
l_3	délka výstupní části průvlatu	$[mm]$
v_0	rychlost drátu	$[m/s]$
v_1	rychlost drátu	$[m/s]$
v_2	rychlost drátu	$[m/s]$
v_n	rychlost drátu	$[m/s]$
2α	tažný úhel	$[\circ]$
2β	úhel vstupní části jádra	$[\circ]$
2γ	úhel výstupní části jádra	$[\circ]$
Δl	absolutní prodloužení	$[mm]$
ϵ_l	poměrné prodloužení	$[\%]$
λ	součinitel prodloužení	$[-]$

μ	koeficient tření	$[-]$
ρ	třecí úhel	$[^\circ]$
σ	střední tlakové napětí	$[MPa]$
σ_{ds}	střední deformační odpor	$[MPa]$
σ_l	podélná složka tahového napětí	$[MPa]$
σ_o	obvodová složka tlakového napětí	$[MPa]$
σ_t	tangenciální složka tahového napětí	$[MPa]$
σ_r	radiální složka tahového napětí	$[MPa]$
τ	smykové napětí	$[MPa]$

1. ÚVOD

Téma mé bakalářské práce je velmi spjato s osvětlovacím průmyslem a to přesněji s výrobou wolframových drátů, které byly vedle osmí již od počátku do žárovek instalovány díky svým bezkonkurenčně výborným vlastnostem. Tyto dráty z vysokotavitelného kovu jsou vyráběny technologií tažení. Vzhledem k vysoké teplotě rekrytalizace wolframu jde o objemové tváření za studena. Technologie výroby žhavicích vláken z wolframu je podstatně náročná a vyžaduje přesné provedení. Jak již jejich definice napovídá, jde o dráty velmi malých průměrů, po kterých je žádáno velkých výsledků. Proto je velmi důležité, aby byly sledovány veškeré negativně působící vlivy při výrobě těchto drátů. Jedním z velmi podstatných vlivů na výsledné parametry žhavicích vláken z wolframu je velikost výrobní rychlosti. Tématem mé bakalářské práce bylo experimentálně ověřit vliv výrobní rychlosti na výsledné parametry tažených drátů. Dnešní trendy výroby se snaží minimalizovat výrobní časy a maximalizovat produkci výroby. To sebou nese vyšší nároky pro výrobní stroje, nástroje a podobně.

Pro vypracování mé bakalářské práce mi bylo poskytnuto zázemí ve společnosti Osram s.r.o. Tato společnost je jednou ze dvou největších dodavatelů produktů pro světelný průmysl na světě. Základem všeho jsou tedy wolframové a také molybdenové dráty, které se zde vyrábí. Molybdenové dráty slouží jako podpěrný drát wolframového žhavicího vlákna v žárovce. Druhá funkce molybdenového drátu je ta, že slouží jako jádro pro wolframovou spirálu. Toto jádro se později chemickými procesy rozpustí.



Obr. 1. Aplikace wolframového a molybdenového drátu

V této práci je nejprve rozebrána podrobná teorie technologie tažení. Je vysvětleno a popsáno chování materiálu při průchodu kuželovým průvlakem, mazání při výrobě a

tepelné zpracování. Následně jsou popsány průvlaky pro tažení a jejich materiály. Jsou rozebrány vlastnosti a chování použitých vysokotavitelných materiálů molybdenu a wolframu. Dále je rozebrán teoretický vliv na kvalitativní parametry drátu a jsou zde také popsány vady, které se u drátů při výrobě objevují. Experimentální část je zaměřena na sledování průběhu síly a její stability při změnách výrobních rychlostí. Tato část byla rozdělena na měření při třech procesech a to na čištění drátu, tažení a rovnání. Stabilita síly při výrobě těchto drátů může mít vliv na další kvalitativní parametry. Všechny tyto výsledky ze všech měření byly zhodnoceny a vyvozen z nich závěr.

2. TECHNOLOGIE TAŽENÍ DRÁTU

- a) Jednoduché tažení: používá se u jedno a víceprůvlakových stolic pro tažení uhlíkových a legovaných ocelí. K tahu dochází působením tažné síly.
- b) Tažení s protitahem: jde vlastně o jednoduché tažení, které je doplněno o protitah. Dojde ke snížení měrné síly na průvlaku a tím i snížení zahřátí průvlaku a také drátu. Životnost průvlaku se tak zvýší. Používá se při tažení velkými rychlostmi a při tažení malých průměrů drátu.
- c) Stupňovité tažení: je vhodné pro tažení drátu z rychlořezných ocelí, dále pro oceli, které je obtížné tvářet. Deformace je rozložena do více stupňů. [1]

Technologie tažení drátu je doprovázena plastickou deformací, která vzniká při průchodu taženého drátu nástrojem. Nástrojem je v tomto případě průvlak. Současně s průchodem drátu průvlakem dochází k prodloužení drátu ve směru působení hlavního napětí a zmenšování plochy příčného průřezu. Zároveň dochází ke změnám mechanických vlastností a to zvyšováním pevnosti, tvrdosti, meze pružnosti a průtažnosti, ale i snižováním jeho plastických vlastností jako je prodloužení a zúžení. Plastická deformace při tažení drátu probíhá za takových teplot, při nichž tvářením vyvolané zpevnění drátu zůstává zachováno. K tomu, aby nedocházelo k možnému trhání drátu při výrobě tažením, je nutné dodržení zákona rovnosti o objemu drátu procházejících průvlakem za jednotku času. [2]

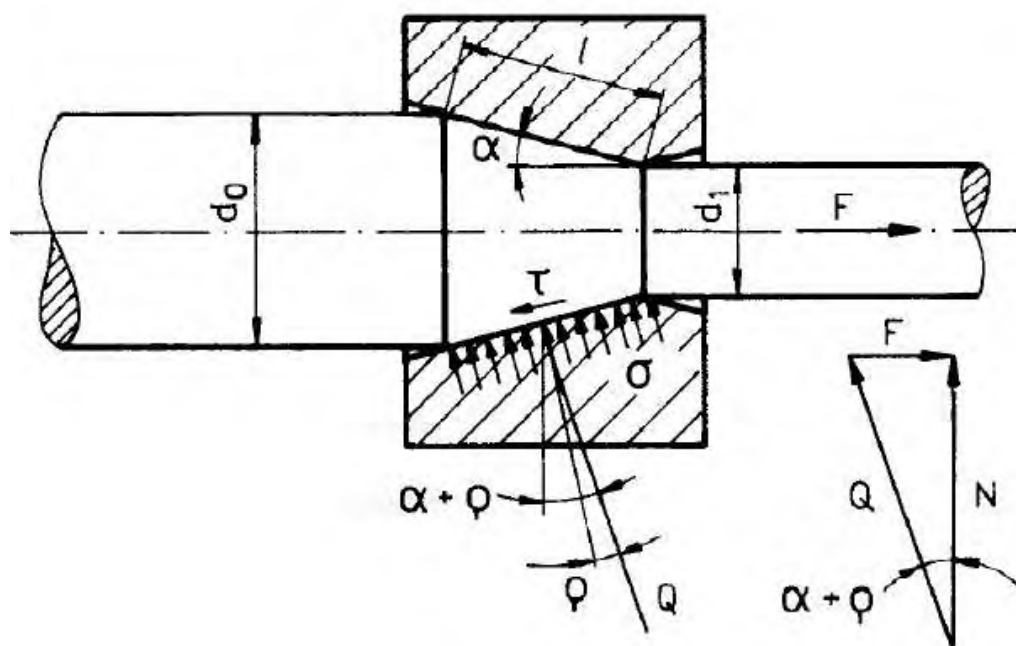
$$S_0 \cdot L_0 = S_1 \cdot L_1 = S_2 \cdot L_2 = S_n \cdot L_n \quad (1)[2]$$

A také

$$S_0 \cdot v_0 = S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 = S_n \cdot v_n \quad (2)[2]$$

kde S_0, S_1, S_2, S_n značí průřezy drátu,
 L_0, L_1, L_2, L_n značí délky drátu,
 v_0, v_1, v_2, v_n značí rychlosti drátu.

Při procesu tažení je vlastním nástrojem deformace kuželová část průvlaku s vrcholovým úhlem 2α , která je zobrazena na **Obr. 2**. Na kuželovém povrchu průvlaku délky „ l “ působí v pásmu deformace příčná síla „ Q “, která je vyvolaná působením vnější tahové síly „ F “. Příčná síla působí vlivem tažného úhlu kužele a tření mezi povrchem drátu a pracovní částí průvlaku ve vztahu k vertikální složce síly „ N “ pod úhlem $\alpha + \rho$. [2]



Obr. 2. Rozložení sil v kuželovém průvlaku [2]

Stanovení základní rovnice pro tahovou sílu

$$F = Q \cdot \sin (\alpha + \rho) \quad (3)[2]$$

$$F = N \cdot \operatorname{tg} (\alpha + \rho) \quad (4)[2]$$

kde: 2α tažný úhel

σ střední tlakové napětí

τ smykové napětí

d_0 vstupní průměr

d_1 výstupní průměr

F tahová síla

Q příčná síla

ρ třecí úhel

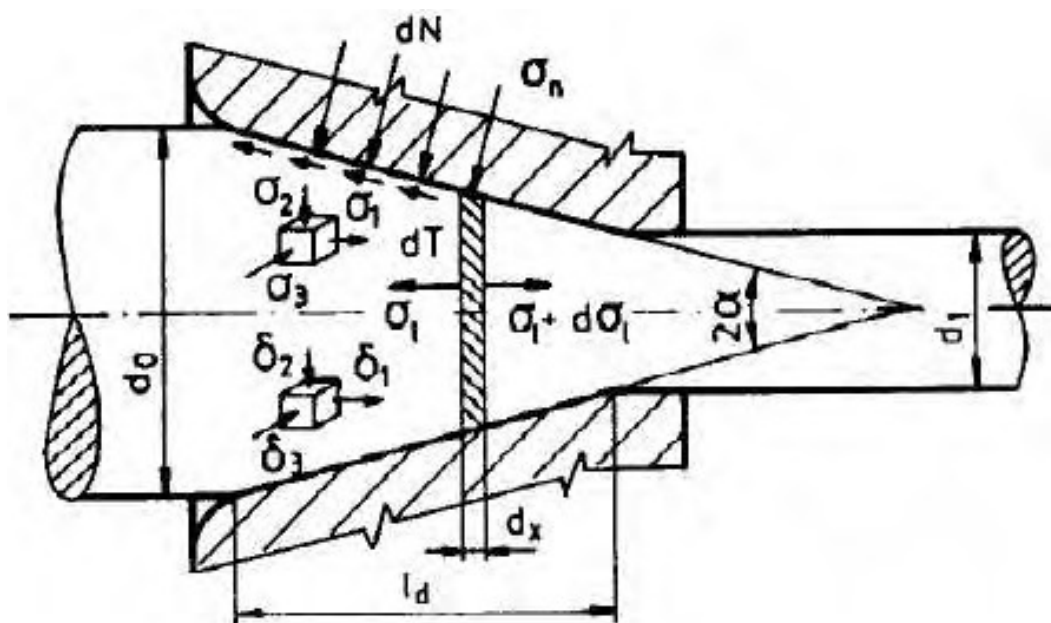
2.1 Rozbor napěťového stavu v průvlaku

Znalost stavů napjatostí v pásmu deformace při tažení v kuželovitém průvlaku a jejich matematická analýza má význam nejen pro výpočet tažných sil a tím pro správné dimenzování tažných stolic, ale i pro návrh hodnocení samotného technologického postupu. Matematický rozbor úlohy je komplikovaný, protože geometrická povaha

pochodu a tangenciální napětí vyvolaná vnějším třením mají za následek, že se směry hlavních os napjatosti neshodují s geometrickými osami pásma deformace. Tento faktor ovlivňuje hlavně mechanickou podmínku plastičnosti při tažení, kterou je výhodné použít pro řešení metodou skluzových linií, protože stav deformace lze považovat za osově symetrickou rovinou úlohu. Dostatečně velké deformace materiálu při tažení jsou způsobeny tím, že v pevném průvlaku je vyvolán tříosý stav napjatosti s tlakovým napětím v příčném směru. U výrobku kruhového průřezu je to radiální všestranný tlak, který je podmínkou pro vyvolání požadovaných velkých plastických deformací a rozměrových změn drátu. Ovšem největší hlavní napětí je napětí tahové a to v podélném směru, které je vyvoláno účinkem tažné síly. Díky tomu ve schématu tříosé napjatosti převažují tahová napětí, což omezuje velikost plastické deformace při jednom průchodu průvlakem. Další omezení je způsobeno zpevňováním kovu při tažení za studena. [2]

2.2 Rozbor deformace

Pracovní části průvlaku pro tažení drátu mají základní kuželovitý tvar, jak je znázorněno na **Obr. 3**. Kuželovitá část průvlaku přechází v krátkou válcovitou pracovní část, která má kalibrační funkci a upravuje přesný rozměr taženého drátu. [2]



Obr. 3. Stav napjatosti v kuželovém průvlaku [2]

Materiál o výchozím průměru d_0 se vlivem účinku tažné síly F protahuje průvlakem, jehož průměr d_1 udává konečný rozměr drátu po tažení. Na kuželovitém povrchu taženého

drátu působí v pásnu deformace elementární normálové tlaky d_N a elementární třecí síly $d_T - \mu d_N$. Tyto síly zásadně rozhodují o celkovém stavu napjatosti v pásnu deformace. Normálové tlaky a třecí síly ve válcovité části průvlaku jsou podstatně menší a nemají vliv na průběh deformace ve vlastním deformačním pásnu. V libovolném příčném elementu materiálu v pásnu deformace, který má nekonečně malou tloušťku d_x , působí na kuželovitém povrchu normálové napětí σ_n a tečné napětí $\tau = \mu \cdot \sigma_n$. V příčných řezech působí podélné tahové napětí σ_1 a $(\sigma_1 + d\sigma_1)$, které není v příčném průřezu rozděleno rovnoměrně. Další napětí působí v obvodovém směru, jde o napětí tlakové σ_θ . [2]

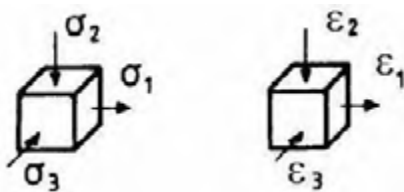
V libovolném bodě kuželovité části pásma deformace je tříosý stav napjatosti vyznačený těmito hlavními napětími: [2]

- absolutně největším tahovým napětím σ_1 , které působí v podélném směru,
- středním tlakovým napětím σ_2 , které působí v radiálním směru,
- absolutně nejmenším tlakovým napětím σ_3 , které působí v obvodovém směru.

Tomuto tříosému stavu napjatosti odpovídá tříosý stav hlavních deformací:

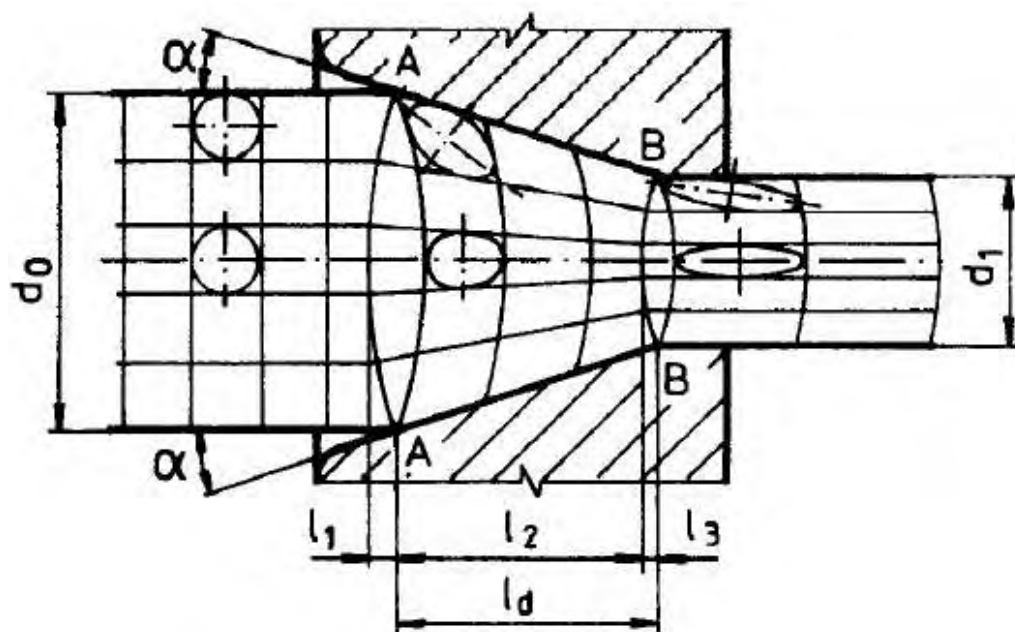
$$+\sigma_1; -\sigma_2; -\sigma_3 \qquad +\varepsilon_1; -\varepsilon_2; -\varepsilon_3$$

Schéma napětí a deformace při procesu tažení je znázorněn na **Obr. 4**.



Obr. 4. *Napětí a deformace při procesu tažení* [2]

Intenzitu podélné deformace je možno zkoumat v podélných osových řezech na deformaci kružnic, které znázorňují elementární částice kovu, **Obr. 5**. Původní čtvercová síť, do které jsou kružnice vepsány, se deformuje tím způsobem, že tyto kružnice se protahují v elipsy a samotná síť se zakřivuje. Hlavní osy kružnic, které jsou v původním stavu rovnoběžné s osou tažení a kolmé k této ose, mění v průběhu tažení svůj sklon vzhledem k této ose, s výjimkou elementů, které leží v ose tažení. [2]



Obr. 5. Průběh deformace při tažení [2]

Zkosení původně čtvercových obrazců sítě a zakřivování jejich stran, jakož i znázorněné deformace zakreslených kružnic je důkazem, že podélné deformace v jednotlivých příčných průřezech nejsou rozděleny rovnoměrně, jde o nehomogenní podélné deformace. Proto je možno intenzitu deformace v jakémkoliv příčném průřezu pásma deformace vyjádřit podle nauky o plasticitě jen formou diferenciálu této intenzity. Pro deformaci ve směru hlavních os elementárních elips (původně kružnic) pak platí následující vztah: [2]

$$dS_{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{d\varepsilon_l^2 + d\varepsilon_r^2 + d\varepsilon_t^2} \quad (5)[2]$$

kde $d\varepsilon_l$ - poměrná deformace ve směru prodlužování elementární částice

$d\varepsilon_r$ - poměrná deformace částice v radiálním směru

$d\varepsilon_t$ - poměrná deformace částice v obvodovém (tečném) směru

V průběhu deformace, které je na **Obr. 5.** je znázorněno pásmo deformace rozkládající se na tři úseky.

- 1) Úsek o délce l_1 , který představuje část objemu, co zatím nevstoupil do geometrického pásma deformace. Velikost a tvar tohoto úseku je závislý na vstupním průměru d_0 , na úhlu taženého drátu 2α , vnějším tření a na velikosti úběru průřezu tedy na průměru d_1 .
- 2) Střední úsek o délce l_2 , který tvoří hlavní část délky l_d . Zde dochází k samotné redukci průřezu drátu. Úsek l_1 tvoří plynulý přechod deformační rychlosti mezi průřezem, kde ještě k deformaci nedochází a průřezem, kde je deformaci vystaven celý průřez taženého drátu.
- 3) Úsek l_3 , který představuje část objemu materiálu v geometrickém pásmu deformace. Zde je průřezová redukce u konce a nastává vyrovnání deformační rychlosti v jednotlivých vláknech.

[2]

Poměrný plošný úběr	$Q = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \cdot 100 = \frac{d_0^2 - d_1^2}{d_1^2} \cdot 100$	%	(6)
Absolutní plošný úběr	$Q_{abs} = S_0 - S_1$	mm^2	(7)
Poměrné prodloužení (tažnost)	$\varepsilon_l = A = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100$	%	(8)
Absolutní prodloužení	$\Delta l = l_1 - l_0$	mm	(9)
Součinitel prodloužení	$\lambda = \frac{l_1}{l_0} = \frac{d_0^2}{d_1^2} = \frac{100}{100 - Q}$	-	(10)
Skutečná deformace	$e_l = \ln \frac{S_0}{S_1}$	-	(11)

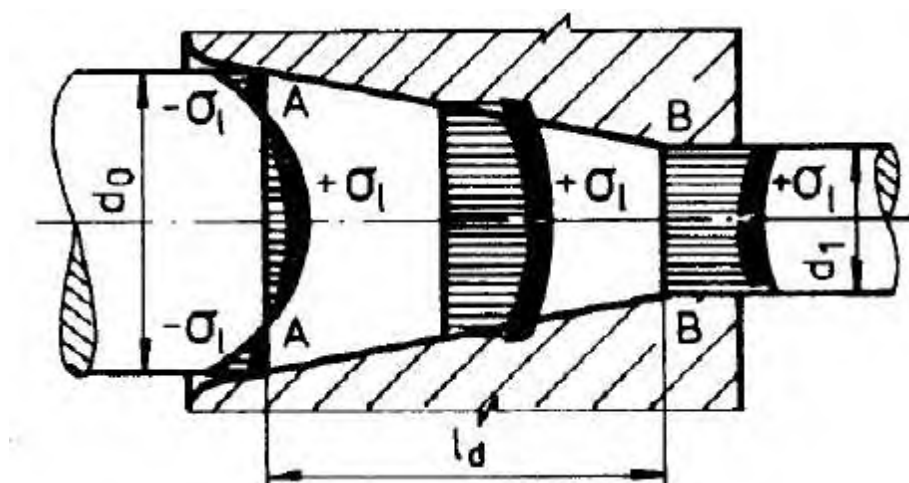
Tab. 1. Vzorce pro výpočet deformací při tažení [2]

$S_0 = S_1 \cdot \frac{100}{100 - Q}$	$S_0 = S_1 \cdot \frac{100 - Q}{100}$	mm^2	(12)
$d_0 = d_1 \cdot \sqrt{\frac{100}{100 - Q}}$	$d_0 = d_1 \cdot \sqrt{\frac{100 - Q}{100}}$	mm	(13)
$l_0 = l_1 \cdot \frac{100 - Q}{100}$	$l_1 = l_0 \cdot \frac{100}{100 - Q}$	mm	(14)

Tab. 2. Vzorce pro výpočet rozměrů drátu [2]

2.3 Rozbor napjatosti

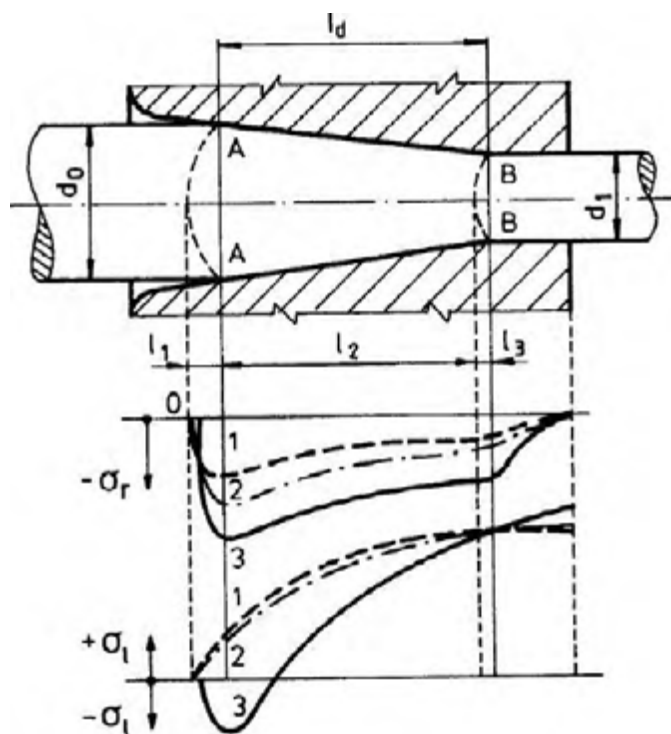
Průběh deformace je složitý v celém objemu tvářecího kovu a v pásnu deformace je spjat se složitým rozdělením a průběhem napětí v jednotlivých místech tohoto objemu. U tažení kruhové tyče lze uvažovat, že v jednotlivých příčných řezech pásma deformace je rozdělení podélných složek napětí σ_l jednotvárné. [2]



Obr. 6. Průběh podélných napětí [2]

Lze předpokládat homogenní stav napjatosti v oblasti počátku pružných deformací, kde působí napětí σ_l , které odpovídá vznikající pružné deformaci. V pásnu, kde vzniká plastická deformace působí na vrstvy povrchu tlaková napětí $-\sigma_l$. Tyto napětí mohou vyvolat i napěchování kovu. Vnitřní vrstvy jsou už vystaveny tahovým složkám napětí $+\sigma_l$. V libovolně zvoleném příčném průřezu ve středu pásma deformace jsou pouze podélné tahové složky $+\sigma_l$ s maximem v osovém vláknu. V průřezu pásma deformace, který je výstupní, jsou jinak pouze tahové složky $+\sigma_l$, ale i maxima vykazují jen povrchové vrstvy. [2]

Radiální složky společně s obvodovými složkami napětí v jednotlivých příčných řezech musí být stejně velké, tzn. $\sigma_r = \sigma_\theta$. Jedná se o tlakové složky. Pro posouzení technologického procesu tažení je důležitá znalost průběhu napětí po délce pásma deformace. Týká se to jak radiálních složek σ_r , tak hlavně podélných složek σ_l . Zároveň je potřeba pozorovat tyto složky v celém rozsahu deformace. Tedy od vzniku nejprve pružných deformací a následně plastických deformací. To vše do chvíle, než tažený drát vystupuje z průvlaku a dojde k odpružení drátu. Zmíněný průběh je na Obr. 7. [2]



Obr. 7. Průběh radiálních a podélných napětí [2]

2.4 Tažná síla

Správně zvolená tažná síla umožňuje optimální využití strojů pro tažení a zamezí případnému přetržení nebo narušení drátu při samotném tažení.

Tažná síla se řídí dle:

- Mechanických vlastností taženého materiálu (chemické složení, strukturní stav, stav předchozího zpevnění)
- Plošného úběru: tažná síla roste s rostoucím plošným úběrem
- Tvaru výrobku: se zvyšující hodnotou obvodu při konstantní hodnotě příčného průřezu roste i tažná síla. Nejnižší hodnota tažné síly je v případě, kdy je tažen drát kruhového průřezu.
- Tvar průvlaku: v případě, kdy je malá hodnota tažného úhlu α se zvyšují účinky třecích sil. Naopak však dojde k lepším podmínkám pro mazání. Se zvětšením tažného úhlu dojde k nerovnoměrnější deformaci, zvýšení rychlosti deformace a zhoršení mazání.

[1]

Rovnice pro výpočet tažné síly

$$Ft = \sigma_{ds} \cdot V \cdot \ln \frac{S_1}{S_2} \left(1 + \frac{\mu}{\sin \alpha \cdot \cos \alpha} + \frac{2\alpha}{3 \ln \frac{S_1}{S_2}} \right) [N] \quad (15)[1]$$

Kde S_1, S_2 je příčný průřez před průchodem a po průchodu drátu (m^2)

μ - součinitel tření na stykové ploše

α - úhel průvlaku (tažný úhel)

σ_{ds} - střední deformační odpor (MPa)

V - deformovaný objem (m^3)

2.5 Tepelné zpracování při tažení

Při výrobě taženého drátu má tepelné zpracování tyto dva významy:

- a) Mezioperační tepelné zpracování pro obnovu plastických vlastností
- b) Konečné tepelné zpracování (může být jako poslední nebo předposlední operace, kdy po té dojde k tažení na konečný průřez) [1]

Způsoby tepelného zpracování

Rekrystalizační žíhání: Za teplot 550 - 650°C. používá se poměrně málo.

Žíhání na měkko: výsledná struktura je feritická s globulitickým cementitem. U ocelí nízkouhlíkových je žíhání na měkko zároveň žíháním rekrystalizačním. U vysokouhlíkových ocelí se žíhání na měkko používá před konečným kalibračním tahem.

Nízkoteplotní napouštění: používá se výhradně pro výztuže do předepjatého betonu. Provádí se jako poslední operace při teplotě 300 - 400°C. Snižuje relaxační ztráty (snížuje možnost přeměny pružné deformace na plastickou).

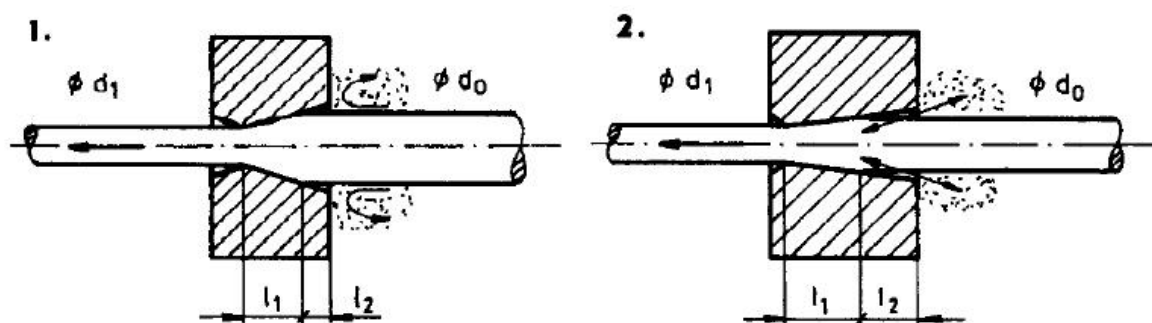
Zušlechťování: je složeno z kalení při teplotách 750 - 900°C a rychlého ochlazení s následujícím popouštěním za teplot 300 - 450°C.

Patentování: používá se za účelem získání jemně lamelární perlitické struktury. Po ohřevu na 850 - 1000°C následuje rychlé ochlazení v olověné nebo solné lázni, která má teplotu 450 - 580°C. Použití sodných nebo draselných solí je levnější a hygieničtější, ale méně kvalitní než patentování v olovu. [1]

2.6 Mazání při tažení

Jedním z velké řady faktorů zásadně ovlivňujících průběh tažení je mazivo a jeho vhodné použití a složení. Oblast výroby současně používaných maziv je založena na dlouholetých praktických zkušenostech a celosvětových výzkumech. [3]

Drát slouží jako nosič maziva, který prochází přes nádobu s mazivem a dále pokračuje skrz průvlak. Pro lepší mazací schopnost se volí na první průvlak větší úhel mazacího kužele než ostatní průvlak. Dalším důležitým faktorem, který ovlivňuje množství nabraného maziva je délka mazacího kužele. Vliv délky je znázorněn na **Obr. 8**. V případě, kdy je délka příliš malá, je mazivo hromaděno před průvlakem. Mazací tlak není dostatečně velký, aby vtáhl mazivo skrz průvlak. V druhém případě mazivo nemůže téci zpět, protože další přísun maziva vytvořil dynamický tlak. [3]



Obr. 8. Vliv rozměrů mazacího kužele [4]

Rozdělení maziv

Podle chemického složení:

- | | |
|-------------------|-----------------------|
| - Minerální oleje | - Mýdla |
| - Emulze | - Maziva s plnidly |
| - Rostlinné oleje | - Živočišné tuky |
| - Tuhé uhlovodany | - Konzistenční maziva |

Podle způsobu použití v praxi:

- Maziva tuhá
- Maziva polotuhá
- Maziva kapalná

Podle technologie tažení:

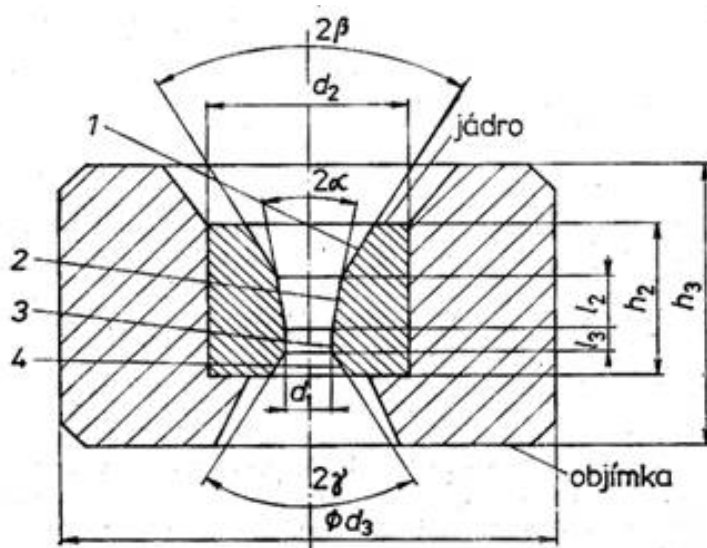
- | | |
|------------------------------|------------------------------|
| - Maziva pro tažení za sucha | - Maziva pro tažení za mokra |
|------------------------------|------------------------------|

3. PRŮVLAKY PRO TAŽENÍ

Průvlak je hlavní nástroj při procesu tažení, který tvaruje a deformuje drát do požadovaného rozměru a tvaru.

Průvlaky jsou velice namáhané na otěr. Jejich životnost a jakost povrchu má značný vliv na výrobnost a jakost tažených drátů. Vstupní kužel průvlaku má funkci přívodu maziva do pracovní části. Vstupní mazací kužel má úhel rozevření 45° až 60° . Tažný kužel deformuje polotovar na požadovaný rozměr. Úhel vrcholu tažného kuželu α je 10° až 12° . Kalibrační válcová část zajišťuje taženému drátu přesný rozměr a hladký povrch. Výstupní kužel pak brání samotnému poškození průvlaku při přetržení drátu nebo porušení okrajů kalibračního válce. [1]

- 1 – vstupní (mazací) kužel
- 2 – tažný (pracovní) kužel
- 3 – kalibrační válec
- 4 – výstupní kužel
- d_1 – kalibrační průměr
- d_2 – průměr jádra
- d_3 – průměr objímky
- h_2 – výška jádra
- h_3 – výška objímky
- l_2 – délka tažné části
- l_3 – délka kalibrační části
- 2α – úhel tažné části
- 2β – úhel vstupní části jádra
- 2γ – úhel výstupní části jádra



Obr. 9. Schéma průvlaku [1]

3.1 Materiály průvlaků

Velmi důležitá je volba materiálu průvlaku, která má zásadní vliv na životnost tohoto průvlaku. Pro různé materiály tažených drátů volíme různé materiály průvlaků. Hlavní důraz při volbě průvlaku se klade na otěruvzdornost a správnou funkci mazání.

Ocelové průvlaky

Vyrábějí se z legovaných ocelí, popřípadě s pochromováním povrchu. Ocelové průvlaky se vyrábějí buď jednodílné, nebo skládané. U tažení uhlíkových ocelí se jako mazivo používá mýdlový prášek (sodné mýdlo z mastných kyselin). Při tažení

vysokolegovaných slitin se používá směs tří částí mýdla a jedné části práškové síry. Pro tažení drátů nejmenších průměrů je nejvhodnější emulze složená z vody, kyseliny oleinové, kalcinovaného uhličitanu sodného a minerálního oleje. [1]

V dnešní době je použití ocelových průvlaku velmi malé a jsou postupně nahrazovány odolnějšími a trvanlivějšími průvlakami ze slinutého karbidu.



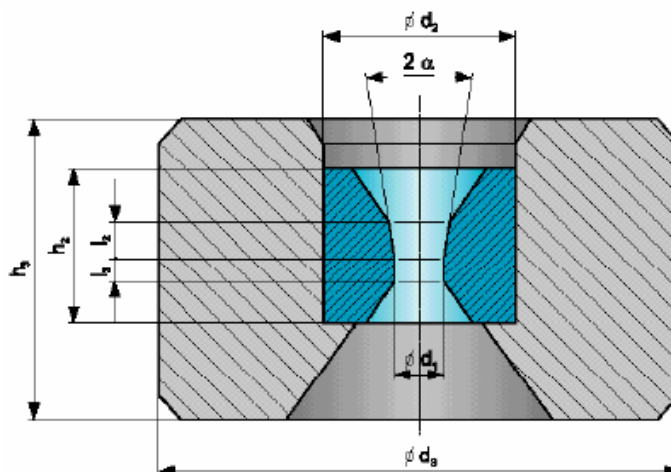
Obr. 10. *Ocelové průvlaky* [6]

Průvlaky ze slinutého karbidu

Jsou nazývané též jako tvrdokovové průvlaky. Jádru průvlaku se vyrábí ze směsí karbidů wolframu WC a karbidů titanu TiC, jako pojivo je použit kobalt. Tyto karbidy vysokotavitelných kovů dodávají jádru vysokou tvrdost a otěruvzdornost. K výrobě objímek se používá uhlíková ocel o pevnosti v tahu v rozmezí 500 – 700 MPa. Pro výrobu průvlaků pro tažení za mokra jsou používány objímky z hliníku a mosazi z důvodu lepšího odvodu tepla. Průvlaky ze slinutého karbidu se také povlakuji za účelem získání ještě delší životnosti a zlepšení povrchových vlastností. Nejčastěji se používá boridování a povlakování nitridem titanu. [2]

ROZMĚRY PRŮVLAKŮ

$\varnothing d_1$	průměr kalibračního válce jádra
$\varnothing d_2$	průměr jádra
$\varnothing d_3$	průměr objímky
h_2	výška jádra
h_3	výška objímky
l_2	výška tažného kužele jádra
l_3	výška kalibračního válce
2α	úhel tažného kužele jádra



Typ	Jmenovitý průměr průvlaku d_1 od do	Jádru				Objímka	
		$\varnothing d_2$	h_2	l_2	l_3	$\varnothing d_2$	h_2
S1	0,20 – 3,00	12	10	4,0 – 4,5	0,5 – 1,6	28	20
S2	0,50 – 4,00	16	13	5,5	0,6 – 2,5	43	25
S3	1,60 – 6,50	20	17	7	1,0 – 3,1	43	32
S4	2,50 – 10,50	25	20	3,0 – 4,3	1,6 – 3,3	53	35
M1U	0,15 – 1,60	9	6	0,5 – 2,5	0,2 – 1,4	28	14
M1N	0,20 – 2,50	10	8	2,0 – 2,5	0,2 – 1,4	28	14, 16
M2	0,40 – 4,00	14	12	1,5 – 2,9	0,3 – 2,1	43	22
M3	3,50 – 12,00	30	24	10	1,8 – 5,3	75	40
M4	9,80* – 20,00	35	24	10	3,5 – 7,0	75	40

Obr. 11. Výběr průvlaků pro tažení ocelového drátu firmy ŽDB DRÁTOVNA a.s. [7]

Průvlaky z přírodního diamantu

Diamant je nejtvrdší známý přírodní minerál a jedna z nejtvrdších látek vůbec. Jedná se o krystalickou formu uhlíku. V přírodě se diamant vyskytuje ve třech formách nazývaných Bort, Ballas a Carbon. [8]

K výrobě průvlaku jsou zpravidla používány diamanty Bort, které mají vysokou jakost a kruhový tvar. Velikost krystalu závisí na průměru taženého drátu a na materiálu taženého drátu. Z hospodárního hlediska se doporučuje použití krystalů, jejichž velikost je jen o něco málo větší než průměr taženého drátu z důvodu možného přeleštění průvlaku. [2]

Přírodní monokrystalické diamanty se vyznačují vysokou tvrdostí, odolností proti opotřebení, rozměrovou přesností a povrchovou kvalitou drátu. Těmito vlastnostmi dosahuje průvlak z přírodního diamantu vysoké životnosti. Nevýhodou těchto průvlaků je jejich vysoká cena. [2]



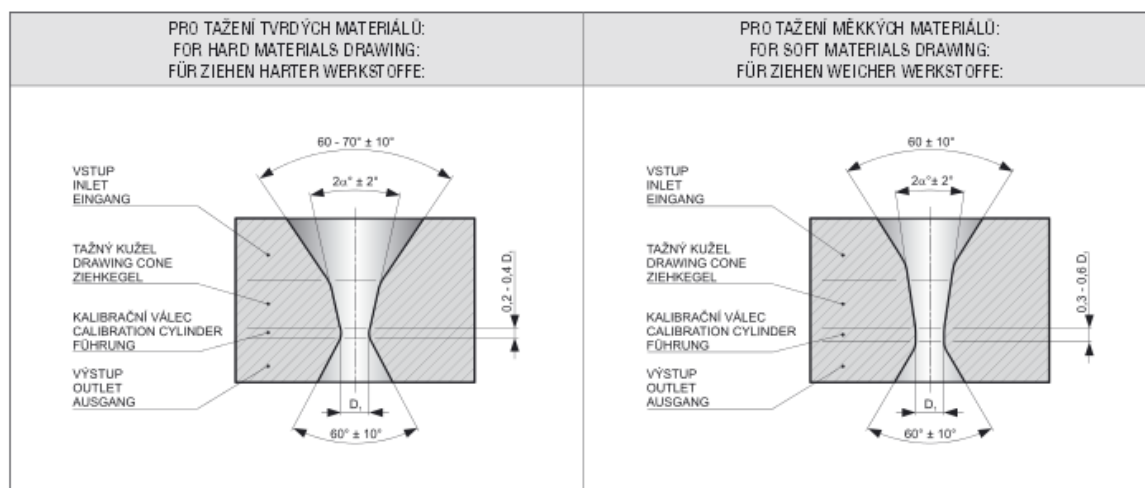
Obr. 12. *Průvlak z přírodního diamantu [9]*



Obr. 13. *Jádro monokrystalického průvlaku [2]*

Průvlaky ze syntetického diamantu

Jde o výrobek připravený slinutím diamantových prášků s přísadami na bázi katalyzátorových kovů při teplotách nad 1500°C a tlacích okolo 6000 MPa. Extrémně vysoké tlaky vyžadují zvládnutí této technologické oblasti. To pak zajišťuje podmínky termodynamické stability a nedojde ke zpětné přeměně diamantu na grafit. Výsledkem slinování je produkt s náhodně uspořádanými zrnky pevně mezi sebou svázanými pojivem. To, že je nepravidelná orientace krystalů má za následek stejnoměrně vysokou tvrdost a odolnost proti opotřebení. [2]



ÚHEL TAŽNÉHO KUŽELE $2\alpha \pm 2^\circ$ ANGLE OF DRAWING CONE $2\alpha \pm 2^\circ$ WINKEL DES ZIEHWINKELS $2\alpha \pm 2^\circ$		TAŽENÉ MATERIÁLY MATERIALS TO BE DRAWN GEZOGENE WERKSTOFFE
Měkké materiály Soft materials Weiche Werkstoffe	18°	Ni + slitiny Ni / alloys Ni / Legierungen Ni
	20°	Cu + slitiny Al / alloys Cu / Legierungen Cu
	22°	Al, Au, Ag, Pb, Zn
Tvrdé materiály Hard materials Harte Werkstoffe	12°	W, Mo
	14°	ocel nad 0.4% C / steel C over 0.4 % / Stahl über 0.4 % C
	16°	Br, Ms, ocel do 0.4% C / Br, Ms, steel C to 0.4 % / Br, Ms, Stahl bis 0.4 % C

PRŮMĚR D_1 DIAMETER D_1 DURCHMESSER D_1	TOLERANCE TOLERANCE TOLERANZ	OVALITA OVALITY OVALITÄT
0.050 ÷ 0.110	+ 0.0010	+ 0.0010
0.111 ÷ 0.200	+ 0.0015	+ 0.0010
0.201 ÷ 0.400	+ 0.0020	+ 0.0015
0.401 ÷ 0.600	+ 0.0025	+ 0.0015
0.601 ÷ 1.000	+ 0.0030	+ 0.0020
1.001 ÷ 1.400	+ 0.0040	+ 0.0025
1.401 ÷ 2.500	+ 0.0050	+ 0.0030
2.501 ÷ 4.000	+ 0.0060	+ 0.0040

Obr. 14. Katalog průvleků ze syntetického diamantu firmy Urdiamant, s.r.o. [10]

4. POUŽITÍ VYSKOTAVITELNÝCH KOVŮ PŘI TAŽENÍ

Při zpracovávání této práce a její praktické části bylo použito tažených drátů z vysokotavitelných kovů a to wolframu a molybdenu, které si nyní charakterizujeme. Wolframový tažený drát se používá jako samostatné žhavicí vlákno, buď jednoduché nebo spiralizované. Molybden je použit jako podpěra v samotných žárovkách nebo slouží jako jádro, na které se navíjí wolframová spirálka. Molybdenové jádro je pak později chemickými procesy rozpuštěno.

4.1 Molybden

Jde o stříbřitý až šedobílý, tvrdý a křehký kov se značným vysokým bodem tání. Krystaluje v těsně centrované kubické mřížce. Na vzduchu je za normální teploty stálý, stejně tak je odolný vůči působení vody. S vodíkem nereaguje a nevytváří žádné hydridy. Vůči působení minerálních kyselin je poměrně stálý, především oxidačně působící kyseliny pasivují jeho povrch a chrání jej tak před dalším napadením. [11]

Výskyt molybdenu je poměrně vzácný. Odhad obsahu molybdenu v zemské kůře je 1,5-8mg/kg. V rudách je jeho výskyt v nízkých koncentracích. Nejvíce významnou rudou je molybdenit neboli sulfid molybdeničitý. Ten se nejvíce vyskytuje zejména v americkém Coloradu. [11]



Obr. 15. Molybden [11]

Výroba molybdenu je prováděna redukcí oxidu molybdenového vodíkem pomocí fluidní pece. Redukce oxidu molybdenového probíhá postupně v jednotlivých teplotních pásmech pece ve třech krocích a při teplotách 400 – 1100°C. Produktem redukce je molybden v práškové formě. Ten se následně slinovacím procesem převádí do kovové podoby. [12]

Významným užitím molybdenu je jeho přidávání do oceli. Legováním oceli molybdenem dosáhneme zvýšení tvrdosti a v jisté míře odolnosti proti korozi. Dále velmi velkou mírou zvyšuje prokalitelnost ocelí a snižuje citlivost ocelí na přehřátí při tepelném zpracování. [4]

Tento vysokotavitelný kov se vyznačuje velkou afinitou ke kyslíku, uhlíku a síře. Jeho mechanické vlastnosti závisí velkou mírou na způsobu výroby. Pevnost vyžíhaného molybdenu je okolo 700 – 800 MPa při tažnosti $A_{10} = 25\%$ a tvrdosti 150 HB. Modul pružnosti v tahu se pohybuje okolo $28 \cdot 10^4$ až $32 \cdot 10^4$ MPa, to je však závislé na způsobu zpracování. Mechanické vlastnosti molybdenu jsou dobré i za zvýšených teplot, kde u ostatních kovů dochází už k tavení. Použitelnost molybdenu je omezeno nad teplotami 500°C, kdy začíná oxidovat. Oxid molybdenu se při těchto teplotách tvoří na povrchu a nedokonale jej chrání z toho důvodu, že se při teplotách okolo 550°C vypařuje. Vlastnosti molybdenu jsou značně zhoršovány už při malém obsahu nečistot. Plastické vlastnosti za studena zhoršuje kyslík, přesahuje jeho obsah 0,003%. Totožně také působí uhlík při obsahu přesahující 0,03%. [5]

Tváření molybdenu se provádí z počátku za tepla, konečné deformace mohou probíhat i za studena. Hodnota teploty rekrytalizace závisí na míře znečištění. Její minimální hodnota je kolem teploty 900°C. Velmi dobré houževnatosti u molybdenu dosáhneme po deformaci 50% za studena. Po rekrytalizačním žihání je dosaženo malé vrubové houževnatosti a je křehký při ohýbání. [5]

Molybden se nerozpouští v kyselině chlorovodíkové, fluorovodíkové a nepůsobí na něj ani roztoky alkalických louhů. Oxiduje pouze v horké kyselině sírové a dusičné. [5]

Teplota tání	2617°C	Modul pružnosti v tahu	20 GPa
Teplota varu	4612°C	Tvrdost podle Brinella	1500 MPa

Tab. 3. Vlastnosti molybdenu [12]

4.2 Wolfram

Je to šedý až stříbřitě bílý lesklý kov, který je obzvláště složitě tavitelný. Wolfram je držitelem nejvyšší teploty tavení ze všech doposud objevených kovů. Velký význam zastupuje také jeho vysoká hustota, jen některé drahé kovy jako je zlato, platina, iridium a osmium jsou těžší. Z chemického hlediska je wolfram velice stálý a vůči působení vody a atmosférických plynů zcela netečný. S kyslíkem a halogeny reaguje až za výrazně vysokých teplot. Dále také odolává většině běžných minerálních kyselin. [13]

Stejně jako výskyt molybdenu je také výskyt wolframu poměrně vzácný. Jeho obsah je odhadován na 1,5 – 34 mg/kg v zemské kůře. Hlavní wolframové rudy jsou wolframit, ferberit, hübnerit, scheelit a stolzit. Nerost o nejvyšším obsahu wolframu je qusongit, chemicky jde o karbid wolframu. Nejvýznamnější naleziště wolframu je Čína, kterou dále následuje Rusko. V České republice jsou jako naleziště evidovány Kašperské hory. [14]



Obr. 16. *Wolfram* [15]



Obr. 17. *Sintrovaný wolfram* [13]

Wolfram se vyrábí tavením rudného koncentráту se sodou nebo hydroxidem sodným v plamenné peci při teplotě 800 – 900°C. Tavenina se louží vodou, do níž přechází vzniklý wolfram sodný. Poté za působení kyseliny chlorovodíkové vzniká sraženina oxidu wolframového. Čistý wolfram se pak získá redukcí oxidů. [14]

Podobně jako molybden, je také wolfram důležitým legujícím prvkem ocelí, kterým dodává tvrdost tvorbou karbidů a odolnost proti opotřebení. Velkou mírou se používá legování wolframem u rychlořezných ocelí. Velké uplatnění je také v práškové metalurgii, kde karbid wolframu tvoří základní fázi slinutých karbidů. Dále se z wolframu vyrábí netavící elektrody pro svařování v inertních plynech.

Použití wolframu za vyšších teplot je do značné míry omezováno jeho snadnou oxidací. Oxidace nastává již za teploty 500 – 600° C a s rostoucí teplotou se zvyšuje. Oxid wolframu, který vznikne je nestabilní a téká již za teploty 850°C a netvoří přirozenou ochranu povrchu wolframu. Zvýšení oxidační odolnosti lze přidáním přísad, jako jsou hafnium nebo niob a to až do 10%. Průmyslové užití technicky čistého wolframu je dáno jeho vlastnostmi. Pro velmi vysokou teplotu tání a malou rychlost odpařování za vysokých teplot ve vakuu je wolfram, jak již bylo řečeno, důležitým materiálem pro výrobu žhavicích vláken. Odpařování wolframu se zde omezuje na minimální míru argonem nebo kryptonem. [5]

Teplota tání	3422°C	Modul pružnosti v tahu	411 GPa
Teplota varu	5660°C	Tvrdost podle Brinella	2570 MPa

Tab. 4. *Vlastnosti wolframu* [14]

5. TEORETICKÝ VLIV VÝROBNÍ RYCHLOSTI NA PARAMETRY DRÁTU

Jak již ze zadání vyplývá, tato práce se zaměřuje na výrobní rychlost a její vliv na parametry taženého drátu. Možná změna výrobních rychlostí může nepříznivě ovlivňovat jeho mechanické vlastnosti a další kvalitativní parametry. Může také dojít k většímu výskytu vad drátu. Jedná se o výrobní rychlost při samotném procesu tažení, kde produktem je wolframový černý drát nebo v procesu čištění drátu a v poslední řadě jde o rychlost při procesu rovnání zvlněného wolframového drátu.

5.1 Rychlost tažení

Se zvyšující rychlostí tažení dojde ke zvýšení rychlosti deformace a tedy i ke zvýšení deformačního odporu. Ačkoliv množství práce, potřebné pro deformaci drátu, zůstává pro jednotkový objem tvářeného kovu konstantní. Dochází však ke zvýšení množství vzniklého tepla za jednotku času. V důsledku zvýšení teploty dochází tedy i ke snížení deformačního odporu a současně ke změně koeficientu vnějšího tření. Při špatném odvodu tepla z průvlastku by mohlo dojít k obrovskému nárůstu teploty drátu, což by se mohlo projevit na jevu stárnutí. Působením těchto vlivů dochází ke změně tažné síly v závislosti na rychlosti tažení. Ve chvíli, kdy tepelný efekt nemá výraznější dopad na deformační odpor, dochází ke zvýšení tažné síly. Za vysokých rychlostí tažení působí tepelný efekt na deformační odpor a koeficient vnějšího tření. To směřuje ke snížení tažné síly. Požadavek na zvyšování rychlosti tažení je kladen zejména z ekonomického hlediska, kdy je potřeba docílit co největší produktivity a výkonnosti strojů pro tažení. Reálná rychlost tažení je pak dána konkrétní technologií a způsobu výroby, druhem materiálu, jakostí materiálu a průměru taženého drátu. [16]

5.2 Vady drátů

Každý drát je v průběhu výroby průběžně kontrolován. Zásadním parametrem všech drátů je jeho průměr, který se přepočítává na hmotnostní jednotku mg/200mm. Na kontrolních pracovištích se tedy odmotá část drátu, odebere se vzorek dlouhý 200mm a zváží se. Vážený průměr drátu se pak musí pohybovat v předepsaných tolerancích. Další kritéria jsou správný návin a povrch drátu, které se kontrolují vizuálně. Pokud to udává specifikace drátu, kontrolují se i mechanické vlastnosti drátu.

- **Vady návinu:** Drát musí být na cívku navinutý rovnoměrně bez výstupků nebo jamek. Návin také nesmí být volný, což se zjistí přitlačením pinzety na návin. Pinzeta by se neměla snadno zasunout mezi jednotlivé závity návinu.
- **Povrchové vady:** Čištěný drát musí mít kovově lesklou barvu, pokud je matný, je to považováno za vadu. Další z povrchových vad u čištěného drátu je oxidace, která může být celková nebo nerovnoměrná v určitých místech návinu. Na povrchu čištěného drátu nesmí zůstat zbytky grafitu ani louhu.
- **Poškozený povrch:** Vada se určuje hmatem, kdy protáhneme drát mezi prsty. Pokud jsou cítit vroubky a drát není hladký, je poškozen. Nejčastější příčina je prasklé jádro diamantového průvlatu.
- **Kadeření:** Jde o vadu, jestliže není dodržen průměr tvořícího závitu na konci volně visícího drátu. Podle průměru drátu je pak daný předepsaný průměr utvořeného závitu. Když je průměr utvořeného závitu na volném konci drátu menší, než je předepsáno, jde o vadu.
- **Délka drátu:** Tažený černý drát nebo čištěný drát musí mít požadovanou délku.
- **Průměr drátu:** Průměr je průběžně kontrolován na vahách nebo přímo ve výrobě online měřením pomocí CERSA laseru.

6. EXPERIMENTÁLNÍ VÝROBA DRÁTU RŮZNOU RYCHLOSTÍ

Tato experimentální část bakalářské práce byla prováděna v rámci technické zprávy, která je uvedena v seznamu literatury. Celá tato praktická část spočívala v měření průběhu síly při výrobních procesech. Hlavně se tento experiment soustředil na sledování stability síly. V různých případech výroby může totiž docházet k nestabilnímu průběhu síly, při různých výrobních parametrech. To pak může mít vliv na to, že po celé délce vyrobeného drátu nejsou jeho vlastnosti stejné.

6.1 Výroba a měření na čistících strojích

U tohoto měření byl porovnáván průběh síly na drátu za zvyšování výrobní rychlosti nebo zvyšování hodnoty brzdy u dvou typů strojů. Jednalo se o stroje s elektromagnetickou brzdou a stroje s mechanickou brzdou. Brzda při výrobním procesu udává, jak moc je drát natažen. Stroje s elektromagnetickou brzdou jsou novější a brzdný účinek je vyvolán přitahováním rotoru brzdy na stator. Naopak stroje s mechanickou brzdou jsou v porovnání starší než stroje s elektromagnetickou brzdou. Brzdý účinek je u těchto strojů vyvolán posouváním páky s magnety ke středu brzdného kotouče. Jde o princip brzdění pomocí vířivých proudů. Podrobnosti k měření při různých rychlostech a různých hodnotách jsou uvedeny v technické zprávě. [17]

6.2 Výroba a měření na tažících strojích

Stejně jako u výroby čištěného drátu se zde u výroby drátu tažením sledovala a vyhodnocovala velikost a stabilita průběhu síly při různých rychlostech tažení. Průběh síly na taženém drátu byl měřen ve dvou místech. V prvním případě byl tenzometr, určený k měření síly na drátu, umístěn mezi tažným válcem a navíjecí cívkou. Tažný válec tedy udává tažnou sílu. V druhém případě bylo měřeno v místě mezi konečným průvlakem a tažným válcem. Při samotné výrobě byla nastavená teplota pece na stálou teplotu. Jako mazivo byla použita suspenze grafitu. Všechny jednotlivé výsledky při různých rychlostech jsou uvedeny v technické zprávě. [17]

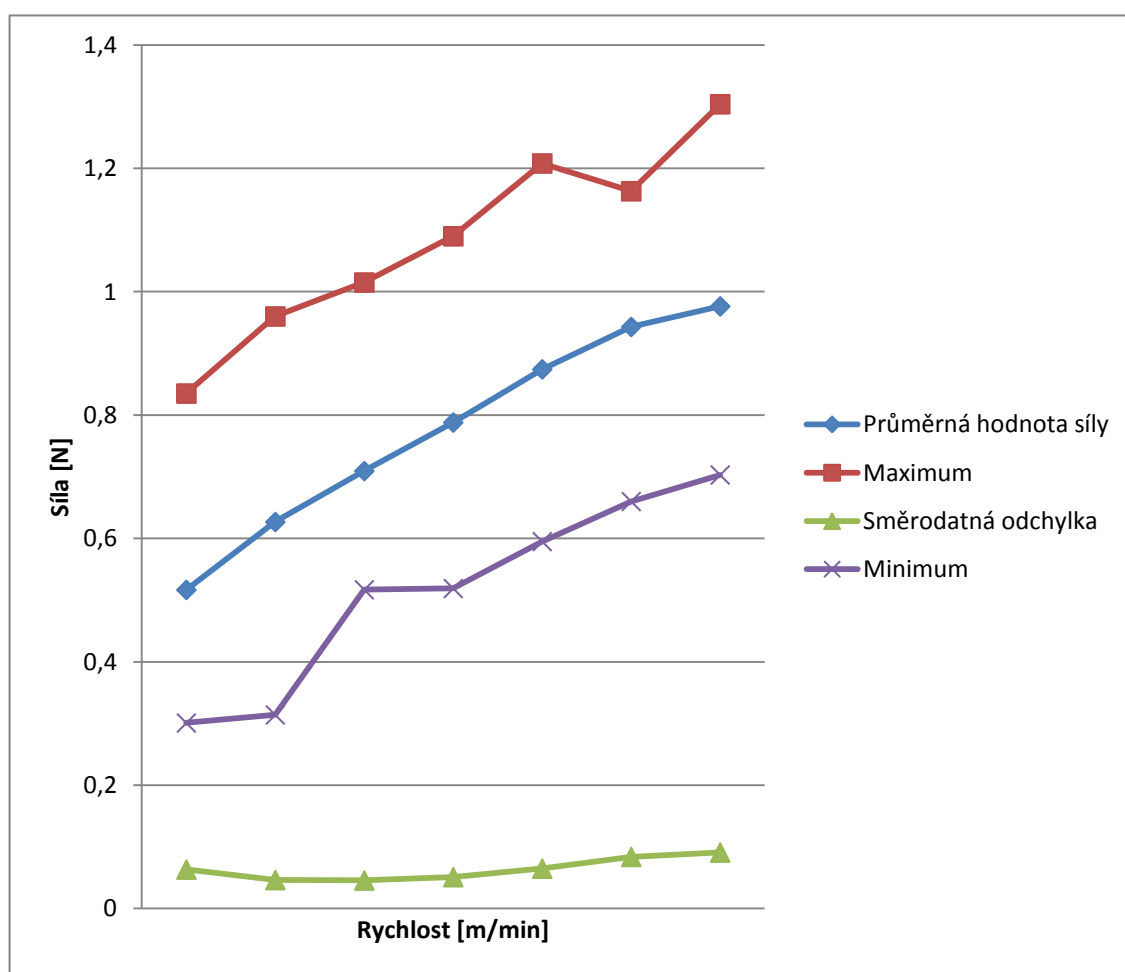
6.3 Výroba a měření na rovnacích strojích

Poslední odvětví výroby bylo termické rovnání. Při tomto procesu je zvlněný wolframový drát rovnán pomocí síly od tažného válce a průchodu vodíkovou pecí o vysoké teplotě. Zde měření probíhalo při stejné rychlosti, ale na různých strojích. Byly tedy porovnávány stroje s rozdílnou variabilitou průběhu síly. V této technologii rovnání je velice důležité, aby síla působící na drát byla co možná nejstabilnější v celém průběhu rovnání. Ve výsledku pak bude mít výstupní narovnaný drát stejné parametry po celé délce jeho návínu. [17]

7. VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU

Podrobné kroky jednotlivých měření v různých výrobních procesech byly zaznamenány a jsou uvedeny v technické zprávě. Ta zahrnuje experimenty na všech třech typech výrobních strojů a k nim veškeré tabulky, grafy a vyhodnocení.

Postup měření byl takový, že byl tenzometr umístěn na určené místo a přes jeho kladky se provlékl drát. Bylo zkontrolováno, zda drát vede přes všechny vodící kladky na stroji. Poté bylo samotné měření spuštěno. Tenzometr byl propojen s přenosným počítačem, na jehož obrazovce byl graf s průběhem sil na drátu. Zpracování všech výsledků z měření probíhalo tím způsobem, že celkový průběh měření byl rozdělen na jednotlivé úseky o určité výrobní rychlosti a ty pak byly samostatně vyhodnocovány. Ukázkový graf průběhu síly a její variability při měření na čistícím stroji s elektromagnetickou brzdou je znázorněn na **Obr. 18**. [17]



Obr. 18. Graf průběhu síly, elektromagnetická brzda [17]

Jako nejdůležitější hodnota byla vyhodnocována variabilita síly, která je zde reprezentována směrodatnou odchylkou. Dále byla vyhodnocována průměrná hodnota síly v celém průběhu při dané rychlosti, minimum a maximum naměřených hodnot síly. Hodnoty minima a maxima byly spíše informativního charakteru, pokud nastala situace, že byl průběh měření narušen výkyvem síly. [17]

Všechna měření z čistících, tažících a rovnacích strojích a výsledky z nich jsou podrobně rozebrána a uvedena v technické zprávě, která je po určitou dobu neveřejná.

8. ZÁVĚR A DISKUZE O DOSAŽENÝCH VÝSLEDKÁCH

Tato bakalářská práce společně s technickou zprávou, která slouží jako podklady k jednotlivým experimentům a měření, byla vypracována na základě svého zadání a to ověření možných vlivů výrobní rychlosti na výsledné parametry produktu. V našem, případě je produkt wolframový drát buď čištěný, rovnaný nebo černý. Z počátku bylo záměrem zkoušet mechanické vlastnosti nebo další kvalitativní parametry těchto různě vyrobených drátů při různých výrobních rychlostech. Rozsah práce by však přesahoval rozsah pro zpracování a řešení bakalářské práce. Proto byla podstata této práce zaměřena na sledování působení síly při zmíněných výrobních procesech. Byly tedy zkoušeny rozdílné hodnoty výrobních rychlostí a při tom byl pozorován průběh sil. Velikost síly, která na drát působí při tažení nebo čištění je velmi důležitá, ale hlavní pozornost byla zaměřena na stabilitu neboli variabilitu těchto sil. V jakých mezích se síla pohybuje a jak je velký rozptyl kolem středních hodnot naměřených sil a zda se tato variabilita mění vzhledem k velikosti výrobních rychlostí. To, že v průběhu výroby při určité rychlosti bude síla, která na drát působí nestabilní, může mít v konečné podobě vliv na jeho kvalitativní parametry.

Samotné výsledky potvrdily předpoklady, že při určitých výrobních rychlostech může být dosaženo nejlepší variability síly. Může být řečeno, že na všech třech způsobech výroby jsou různé výsledky měření a hodnoty se liší. [17]

U čištěného drátu byly porovnávány dva typy strojů v závislosti na variabilitě. Byly to stroje s elektromagnetickou brzdou a stroje s mechanickou brzdou. U obou strojů se projevil nárůst sil při zvyšování rychlosti navíjení. Z hlediska variability obstál lépe stroj s mechanickou brzdou při standardních výrobních rychlostech. Nad těmito rychlostmi naopak došlo k větší stabilitě síly u stroje s elektromagnetickou brzdou. V případě, že budou kladeny větší nároky na progres výroby, bude i nutné zvýšit výrobní rychlost. Pak bude výhodnější práce na strojích s elektromagnetickou brzdou. [17]

Ve výrobě taženého černého wolframového drátu se síla na drátu zvyšováním rychlosti tažení radikálně nezvyšovala a pohybovala se v určitých mezích. Byla nalezena rychlost tažení s největší stabilitou síly. Byl také zaznamenán i nepříznivý vliv řádkovače na průběh sil na drátu, který je potřeba správným seřízením eliminovat. V případě nároků na zvyšování tažných rychlostí je třeba zvážit možné důsledky a to takové, že při vyšších rychlostech dochází k hromadění grafitu na průvlacích. S tím by mohlo docházet k nadměrnému zahřívání nebo poškození průvlatu i drátu. [17]

Poslední část experimentu byla zaměřena na porovnání strojů na rovnání drátu ve strojním parku a to taktéž z hlediska stability síly, která je obzvlášť u tohoto procesu důležitá. Bylo dosaženo zcela rozdílných a v některých případech zcela neuspokojivých výsledků. Nejlépe obstál konstrukčně nejjednodušší stroj nejstarší výroby, kde bylo dosaženo největší stability síly. Ze všech strojů pak nejhorší stability bylo dosaženo na nejnovějším vývojovém stroji. Pro správnou funkci těchto strojů je tedy nezbytně nutné zařídit jejich správné seřízení a nastavení. [17]

V dnešní době jsou kladeny čím dál větší nároky na produkci a na co možné nejnížší náklady. Trend postupuje ve zkracování strojních časů a s tím souvisí i zvyšování strojních rychlostí. Zvyšováním výrobních rychlostí však nemusíme dosáhnout vždy optimálních výsledků z hlediska kvality konečného produktu.

Jak již bylo řečeno, výroba čištěného a taženého drátu probíhá standardně za předepsaných rychlostí. V tomto experimentu však bylo použito i zcela extrémních rychlostí. V obou případech to byly rychlosti až několikanásobně vyšší. Při těchto vysokých rychlostech výroby se mohou vyskytnout neuspokojivé konečné parametry výrobku. U výroby čištěného drátu by docházelo k nedokonalému čištění drátu při tak vysokých rychlostech. Výroba taženého drátu při těchto vysokých rychlostech byla ovlivněna zůstatky grafitu na průvlacích a jeho následnému spékání, což by mělo špatný vliv jak na špatný odvod tepla z průvlastu, tak i na kvalitu samotného drátu. [17]

Všechny tyto výsledky a poznatky z experimentální části této bakalářské práce ukazují na to, že je možné zvýšit ve všech případech výrobní rychlosti, ale musí být technologie výroby zvládnuta tak, aby nedošlo ke zhoršení stabilního průběhu sil na drátu při výrobě oproti nižším rychlostem. Tyto změny pak budou nepříznivě ovlivňovat kvalitativní i v jisté míře mechanické vlastnosti výsledného produktu.

9. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ŽÍDEK, M., DĚDEK, V., SOMMER, B. *Tváření oceli*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988, 520s. DT 669.14; 621.77(075.8)
- [2] FABÍK, Richard. *Vybrané kapitoly z tváření kovů: Tažení/Tváření kovů* [online]. VŠB-TU Ostrava, 2008 [cit. 2013-05-08]. URL: <http://www.fmfi.vsb.cz/miranda2/export/sites-root/fmfi/cs/okruhy/urceno-pro/studenty/podklady-ke-studiu/studijni-opory/633-Fabik-Vybrane-kapitoly-z-tvareni-kovu-kap-1-5.pdf>
- [3] FABÍK, Richard. *Vybrané kapitoly z tváření kovů: Tažení/Tváření kovů* [online]. VŠB-TU Ostrava, 2008 [cit. 2013-05-08]. URL: <http://www.fmfi.vsb.cz/miranda2/export/sites-root/fmfi/cs/okruhy/urceno-pro/studenty/podklady-ke-studiu/studijni-opory/633-Fabik-Vybrane-kapitoly-z-tvareni-kovu-kap-6-10.pdf>
- [4] MOHYLA, Miroslav. *Strojírenské materiály I*. Dotisk 2.vyd. Ostrava: VŠB-TUO, 2006. 146s. ISBN 80-248-0270-8.
- [5] GREGER, Miroslav. *Deformační chování vysokotavitelných kovů a slitin s kubickou stereocentrickou mřížkou při tváření za tepla*. Ostrava: VŠB-TUO, 1998. 90s. RIV:J17/98:27360 239!RIV/1998/MSM/MSM8R30.
- [6] STEEL HEADING INSERTS / PUNCHES. *Header die & tool* [online]. 2013 [cit. 2013-05-08]. Dostupné z: <http://www.header.com/capabilities/steel-heading-inserts-punches.html>
- [7] ŽDB DRÁTOVNA, a.s. *Výrobní katalog* [online]. 2012 [cit. 2013-05-08]. Dostupné z: http://www.dratovna.cz/doc/vyrobniky_katalog_pruvlaky_cz.pdf
- [8] Diamant. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-05-08]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Diamant>
- [9] Přírodní diamantový průvlak. *Hyperinzerce* [online]. 2010 [cit. 2013-05-08]. Dostupné z: <http://nastroje-naradi.hyperinzerce.cz/ostatni-nastroje/inzerat/3578690-prirodni-diamantovy-pruvlak-nabidka/>
- [10] Diamantové nástroje. *Urdiamant* [online]. 2010 [cit. 2013-05-08]. Dostupné z: http://en.sf-diamond.com.cn/?act=cpzs_view&id=18273
- [11] Molybden. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-05-08]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Molybden>
- [12] Periodická tabulka: Molybden. *Prvky* [online]. 2009 [cit. 2013-05-08]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/42.html>

- [13] Wolfram. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-05-08]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Wolfram>
- [14] Periodická tabulka: Wolfram. *Prvky* [online]. 2009 [cit. 2013-05-08]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/74.html>
- [15] Wolfram. *Wikimedia commons* [online]. 2006 [cit. 2013-05-08]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wolfram_1.jpg
- [16] Duckfield, B.J. : The Cold Drawing of Carbon Steel Wire. Wire industry 1971, č.1, Part I. 1972, č.2, Part II.
- [17] JURÁSEK, Robert. *Technická zpráva: Experimentální ověření vlivu výrobní rychlosti na výsledné parametry taženého drátu*. Ostava: VŠB-TU Ostrava, 2013, 76s.

10. SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Číslo	Popis	Strana
Obr. 1.	Aplikace wolframového a molybdenového drátu	- 5 -
Obr. 2.	Rozložení sil v kuželovém průvlaku	- 8 -
Obr. 3.	Stav napjatosti v kuželovém průvlaku	- 9 -
Obr. 4.	Napětí a deformace při procesu tažení	- 10 -
Obr. 5.	Průběh deformace při tažení	- 11 -
Obr. 6.	Průběh podélných napětí	- 13 -
Obr. 7.	Průběh radiálních a podélných napětí	- 14 -
Obr. 8.	Vliv rozměrů mazacího kužele	- 16 -
Obr. 9.	Schéma průvlaku	- 17 -
Obr. 10.	Ocelové průvlaky	- 18 -
Obr. 11.	Výběr průvlaků pro tažení ocelového drátu firmy ŽDB DRÁTOVNA a.s.	- 19 -
Obr. 12.	Průvlak z přírodního diamantu	- 20 -
Obr. 13.	Jádro monokrystalického průvlaku	- 20 -
Obr. 14.	Katalog průvlaků ze syntetického diamantu firmy Urdiamant, s.r.o.	- 21 -
Obr. 15.	Molybden	- 22 -
Obr. 16.	Wolfram	- 24 -
Obr. 17.	Sintrovaný wolfram	- 24 -
Obr. 18.	Graf průběhu síly, elektromagnetická brzda	- 30 -

11. SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

Číslo	Popis	Strana
Tab. 1.	Vzorce pro výpočet deformací při tažení	- 12 -
Tab. 2.	Vzorce pro výpočet rozměrů drátu	- 12 -
Tab. 3.	Vlastnosti molybdenu	- 23 -
Tab. 4.	Vlastnosti wolframu	- 25 -

Poděkování

Tímto děkuji mému vedoucímu práce panu Ing. Janu Povýšilovi, Ph.D. a panu Petru Šimurdovi za odborné vedení a poskytnutí velkého množství cenných rad a informací při tvorbě bakalářské práce.